

Дослідження особливостей отримання та компактування нанодисперсних складових багатокомпонентних матеріалів: Звіт про НДР (заключн.), Укр. держ. ун-т залізн. трансп., 2015. УкрІНТЕІ: держ. реєстрація № 0113U001340, інв. № 0216U000350. С. 9-46

РОЗДІЛ 1

[Л. А. Тимофеева, О. М. Мельник, Г. Л. Комарова, В. О. Чишкала, Ю. Г. Гуцаленко]

СУЧАСНІ УЯВЛЕННЯ ПРО ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ НАНОДИСПЕРСНИХ СКЛАДОВИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ МАТЕРІАЛІВ (ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД)

[38 с. (без джерел за переликом посилань), 4 рис., 2 табл., 118 джерел]

ЗМІСТ:

- 1.1. Особливості структури і властивостей речовини з нанорозмірним масштабом структури.
 - 1.1.1. Термодинамічний та структурний аспекти розмірного фактору.
 - 1.1.2. Вплив методу отримання нанопорошків на їх властивості.
 - 1.1.2.1. Методи деагломерації нанопорошків.
- 1.2. Технологія кераміки на основі нанодисперсних порошків твердих розчинів.
 - 1.2.1. Оксид цирконію: властивості та перспективність застосування.
 - 1.2.2. Поліморфізм Al_2O_3 в наноструктурному стані і методи кристалізації при синтезі багатокомпонентних матеріалів на основі оксиду алюмінію.
 - 1.2.2.1. Технології одержання керамічних матеріалів на основі нанопорошків системи $\text{ZrO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3$.
 - 1.2.3. Особливості синтезу нанопорошків карбідів вольфраму.
 - 1.2.3.1. Композити на основі ZrO_2 з добавками тугоплавких речовин.
- 1.3. FAST-методи – іновативні технології спікання.
- 1.4. Висновки і постановка завдань досліджень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ:

1. Gleiter, H. Materials with ultrafine microstructures : Retrospectives and perspectives / H. Gleiter // Nanostructured Materials. – 1992. – No. 1. – PP. 1-19.
2. Richter, V. On hardness and toughness of ultrafine and nanocrystalline hard materials / V. Richter, M. V. Ruthendorf // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 1999. – Vol. 17. – PP.141-52.
3. Birringer, R. Nanocrystalline materials an approach to a novel solid structure with gas-like disorder / R. Birringer, H. Gleiter, H.-P. Klein // Physics Letters A. – V. 102, No. 8. – PP. 365-369.
4. Birringer, R. Nanocrystalline materials : a first report / R. Birringer, U. Herr, H. Gleiter // Transactions of the Japan Institute of Metals Supplement. – 1986. – № 27. – PP. 43-52.
5. Тананаев, И. В. Успехи физикохимии энергонасыщенных сред / И.В. Тананаев, В. Б. Федоров, Е. Г. Калашников // Успехи химии. – Т. 56, № 2. – 1987. – С. 193-215.
6. Морохов, И. Д. Физические явления в ультрадисперсных средах / И. Д. Морохов, Л. И. Трусков, В. Н. Лаповок // М. : Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.
7. Vissokov, G. P. Structural, phase and morphological features of plasmachemically synthesized ultradispersed particles / G. P. Vissokov // Journal of Materials Science. – 1992. – V. 27, No. 20. – PP. 5561-5568.
8. Перевезенцев, В. Н. Высокоскоростная сверхпластичность алюминиевых сплавов с субмикро- и нанокристаллической структурой / В. Н. Перевезенцев // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. – 2010. – № 5 (2). – С. 58-69.
9. Hiraga, K. High-strain-rate superplasticity in oxide ceramics / K. Hiraga, B. N. Kim, K. Morita, et al. // Science and Technology of Advanced Materials. – 2007. – No. 8. – PP. 578-

587.

10. Zhou, X. Superplasticity of zirconia–alumina–spinel nanoceramic composite by spark plasma sintering of plasma sprayed powders / X. Zhou, D. M. Hulbert, J. D. Kuntz, et al. // *Materials Science and Engineering A*. – 2005. – V. 394. – PP. 353-359.

11. Валиев, Р. З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р. З. Валиев, И. В. Александров. – М : Логос, 2000. – 272 с.

12. Поздняков, В. А. Структурные механизмы разрушения нанокристаллических материалов / В. А. Поздняков, А. М. Глезер // *Физика твердого тела*. – 2005. – Т. 47, № 5. – С. 793-800.

13. Рагуля, А. В. Керамічні нанокompозити для нового покоління ріжучих інструментів і важконавантажених зносостійких компонентів / А. В. Рагуля // *Наука та інновації*. – 2006. – № 4. – С. 47.

14. Андриевский, Р. А. Основы наноструктурного материаловедения. Возможности и проблемы / Р. А. Андриевский. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 252 с.

15. Лихачев, В. Н. Аномальная теплоемкость наночастиц / В. Н. Лихачев, Т. Ю. Астахова, Г. А. Виноградов, М. И. Алымов // *Химическая физика*. – 2007. – Т. 26, № 1. – С. 89-93.

16. Абрамович, А. А. Влияние структуры на теплопроводность нанокompозита $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}$ / А. А. Абрамович, О. В. Карбань, В. В. Иванов и др. // *Физика и химия стекла*. – 2005. – Т. 31, № 4. – С. 764.

17. He, Z. Effect of ceramic dispersion on thermoelectric properties of nano- $\text{ZrO}_2/\text{CoSb}_3$ composites [Електронний ресурс] / Z. He, C. Stiewe, D. Platzek, et al. // *Journal of Applied Physics*. – 2007. – V. 101, No. 4. – Режим доступа : <http://www.researchgate.net/publication/234864397_Effect_of_ceramic_dispersion_on_thermoelectric_properties_of_nano-ZrO2CoSb3_composites>. – Зарол. з екрану.

18. Zhang, S. The effects of particle size and content on the thermal conductivity and mechanical properties of Al_2O_3 /high density polyethylene (HDPE) composites / S. Zhang, X. Y. Cao, Y. M. Ma, et al. // *Express Polymer Letters*. – 2011. – V. 5, No. 7. – PP. 581-590.

19. Lieutenant, J. Experimental analysis of thermal conductivity of enamel filled with micro and nano composite of SiO_2 and TiO_2 / J. Lieutenant, Ganesan, D. Edison Selvaraj, J. Ramathilagam // *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. – 2013. – V. 2, No. 7. – PP. 2907-2912.

20. Andrievski, R. A. Review of thermal stability of nanomaterials / R. A. Andrievski // *Journal of Materials Science*. – 2014. – V. 49, PP. 1449-1460.

21. Lu, A.-H. Magnetic Nanoparticles: Synthesis, Protection, Functionalization, and Application / A.-H. Lu, E. L. Salabas, F. Schuth // *Angewandte Chemie International Edition*. – 2007. – No. 46. – PP. 1222-1244.

22. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы / А. И. Гусев, А. А. Ремпель. – М. : Физматлит, 2000. – 224 с.

23. Азаренков, Н. А. Основы нанотехнологий и наноматериалов : Учеб. пособие / Н. А. Азаренков, А. А. Веревкин, П. Г. Ковтун. – Харьков : ХНУ им. В. Н. Каразина, 2009. – 69 с.

24. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы методы получения и свойства / А. И. Гусев – Екатеринбург : УрО РАН, 1998. – 115 с.

25. Бурканова, Е. Ю. Высокоскоростной механосинтез с использованием дезинтеграторных установок для получения наноструктурированных порошковых материалов системы металл–керамика износостойкого класса / Е. Ю. Бурканова, Б. В. Фармаковский // *Вопросы материаловедения*. – 2012. - № 1(69). – С. 80–85.

26. Gusev, A. I. Production of nanocrystalline powders by high-energy ball milling: model and experiment / A. I. Gusev, A. S. Kurlov // *Nanotechnology*. – 2008. – V. 19,

№. 26. – PP. 265-302.

27. Кульков, С. Н. Особенности фрагментации частиц ZrO_2 при механической обработке / С. Н. Кульков, С. П. Буюкова, И. С. Коноваленко и др. // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, № 3. – С. 67-73.

28. Карагедов, Г. Р. Особенности nanoизмельчения $\alpha-Al_2O_3$ и ZrO_2 / Г. Р. Карагедов, Е. А. Рыжиков, С. С. Шацкая // Химия в интересах устойчивого развития. – 2002. – № 10. – С. 89-98.

29. Кузнецов, П. Н. Твердофазные превращения моноклинного оксида циркония при механической обработке в аппаратах различного типа / П. Н. Кузнецов, Л. И. Кузнецова, А. М. Жижаев и др. // Химия в интересах устойчивого развития. – 2004. – Т. 12, № 2. – С. 193-199.

30. Chena, X. Preparation of nano-sized Bi_2Te_3 thermoelectric material powders by cryogenic grinding / X. Chena, L. Liub, Y. Donga, et al. // Progress in Natural Science: Materials International. – 2012. – V. 22, № 3. – PP. 201-206.

31. Yu, Q. Enhanced fluidization of nanoparticles in an oscillating magnetic field / Q. Yu, R. N. Dave, C. Zhu, et al. // AIChE Journal. – 2005. – V. 51, No. 7. – PP. 1971-1979.

32. Yang, J. Mixing of nano-particles by rapid expansion of high-pressure suspensions / J. Yang, Y. Wang, R. N. Dave, R. Pfeffer // Advanced Powder Technology. – 2003. – V. 14, No. 4. – PP. 471-493.

33. Зырянов, В. В. Механохимический синтез, фазовый состав и свойства сегнетокерамики на основе $Pb(Zn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ / В. В. Зырянов // Неорганические материалы. – 2006. – Т. 42, № 1. – С. 94-100.

34. Zyryanov, V. V. Mechanochemical synthesis of complex oxides and preparation of mixed conducting nanocomposites for CMR / V. V. Zyryanov, N. F. Uvarov, V. A. Sadykov, et al. // Catalysis Today. – 2005. – V. 104, No. 2-4. – PP. 114-119.

35. Хабас, Т. А. Нанопорошки металлов в технологиях керамики : Учеб. пособие / Т. А. Хабас. – 2-е изд. – Томск: Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2009. – 230 с.

36. Алымов, М. И. Порошковая металлургия нанокристаллических материалов / М. И. Алымов. – М. : Наука, 2007. – 169 с.

37. Туревская, Е. П. Исследование алкогелятов металлов для получения оксидных материалов / Е. П. Туревская, М. И. Яновская, Н. Я. Турова // Неорганические материалы. – 2000. – Т. 36, № 3. – С. 265-274.

38. Василевская, А. К. Особенности фазообразования в системе ZrO_2-TiO_2 в гидротермальных условиях / А. К. Василевская, О. В. Альяшева // Наносистемы : физика, химия, математика. – 2012. – V. 3, № 4. – С. 75-81.

39. Kuznecova, L. Hydrothermal synthesis of ZrO_2 and its composites [Електронний ресурс] / L. Kuznecova, and I. Zalite // IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2011. – V. 25. – Режим доступа : <http://iopscience.iop.org/1757-899X/25/1/012023/pdf/1757-899X_25_1_012023.pdf>. – Загол. з екрану.

40. Альяшева, О. В. Размер, морфология и структура частиц нанопорошка диоксида циркония, полученного в гидротермальных условиях / О. В. Альяшева, Б. А. Федоров, А. В. Смирнов, В. В. Гусаров // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2010. – Т. 1, № 1. – С. 26-36.

41. Tok, A. I. Y. Hydrothermal synthesis of CeO_2 nano-particles / A. I. Y. Tok, F. Y. C. Boy, Z. Dong, X. L. Sun // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – V. 190, No. 1-3. – PP. 217 - 222.

42. Альяшева, О. В. Получение нанокристаллов оксида алюминия в гидротермальных условиях / О. В. Альяшева, Э. Н. Корыткова, А. В. Маслов, В. В. Гусаров // Неорганические материалы. – 2005. – Т. 41, № 5. – С. 540-547.

43. Sarkar, D. Formation of zinc oxide nanoparticles of different shapes in water-in-oil microemulsion / D. Sarkar, S. Tikku, V. Thapar, et al. // Colloids and Surfaces A: Physicochemical

and Engineering Aspects. – 2011. – V. 381, No. 1-3. – PP. 123-129.

44. Константинова, Т. Е. Получение нанодисперсных порошков диоксида циркония. От новации к инновации / Т. Е. Константинова, И. А. Даниленко, В. В. Токий, В. А. Глазунова // Наука та інновації. – 2005. – Т. 1, № 3. – С. 76-87.

45. Котов, Ю. А. Исследование характеристик оксидных нанопорошков, получаемых при испарении мишени импульсно-периодическим CO₂ лазером / Ю. А. Котов, В. В. Осипов, М. Г. Иванов и др. // Журнал технической физики. – 2002. – Т. 72, № 11. – С. 76-82.

46. Evans, A. G. Review – transformation toughening in ceramics: martinsitic transformation in crack – tip stress fields / A. G. Evans, A. H. Heuer // Journal of the American Ceramic Society. – 1980. – V. 63, No. 5-6. – PP. 241-248.

47. Shimpi, N. G. Ultrasonic-assisted synthesis of nano-BaSO₄ and its effect on thermal and cross-linking density of epoxy nanocomposites / N. G. Shimpi, S. Mishra // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2013. – V. 32, No. 13. – PP. 947-954.

48. Хасанов, О. Л. Влияние ультразвукового воздействия на параметры кристаллической структуры частиц нанопорошков / О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, А. А. Качаев // Наноструктурные материалы – 2007: II Всероссийская конф. по наноматериалам НАНО – 2007, 13 – 16 марта 2007 г. : тезисы докл. – Новосибирск : ИХТТМ СО РАН, 2007. – С. 85.

49. Rahmanpour, O. New Method for Synthesis Nano Size γ -Al₂O₃ Catalyst for Dehydration of Methanol to Dimethyl Ether / O. Rahmanpour, A. Shariati, M. Nikou. // International Journal of Chemical Engineering and Applications. – 2012. – V. 3, No. 2. – PP. 125-128.

50. Gaudon, M. Morphology and sintering behaviour of yttria stabilised zirconia (8-YSZ) powders synthesised by spray pyrolysis / M. Gaudon, E. Djurado, N. H. Menzler // Ceramics International. – 2004. – V. 30, No. 8. – PP. 2295-2303.

51. Баранов, Ю. В. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработки и новые материалы / Ю. В. Баранов, О. А. Троицкий, Ю. С. Авраамов, А. Д. Шляпин. – М. : МГИУ, 2001. – 843 с.

52. Suryanarayana, C. Mechanical alloying and milling / C. Suryanarayana // Progress in Materials Science. – 2001. – V. 46, No. 1-2. – PP. 1-184.

53. Анциферов, В. Н. Новые материалы / В. Н. Анциферов, Ф. Ф. Бездудный, Л. Н. Белянчиков и др.; под ред. Ю. С. Карабасова. – М. : МИСИС, 2002. – 736 с.

54. Иванов, А. Н. Ультразвуковое диспергирование агломератов нанопорошков Al-AIN, Al₂O₃ и наноструктурных частиц Al₂O₃ / А. Н. Иванов // Известия вузов. Физика. – 2011. – Т. 54, № 12. – С. 103-106.

55. Лукин, Е. С. Современная высокоплотная оксидная керамика с регулируемой микроструктурой. Влияние агрегации порошков оксидов на спекание и микроструктуру керамики / Е. С. Лукин // Огнеупоры и техническая керамика. – 1996. – № 2. – С. 9-18.

56. Плешанов, В. С. Керамические композиционные материалы с нанокристаллической структурой и регулируемой пористостью / В. С. Плешанов. – Режим доступа : <www.sbras.nsc.ru/dvlp/rus/pdf/387.pdf>. – Загол. з екрану.

57. Хасанов, О. Л. Ультразвуковая технология изготовления конструкционной и функциональной нанокерамики / О. Л. Хасанов, В. М. Соколов, Э. С. Двилис, Ю. П. Похолков // Перспективные материалы. – 2002. – №1. – С.76-83.

58. Балоян, Б. М. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения : Учеб. пособие / Б. М. Балоян, А. Г. Колмаков, М. И. Алымов, А. М. Кротов. – М. : Междунар. ун-т природы, общества и человека «Дубна», Филиал «Угреша», 2007. – 125 с.

59. Лякишев, Н. П. Наноматериалы конструкционного назначения / Н. П. Лякишев, М. И. Алымов // Российские нанотехнологии. – 2006. – Т. 1, № 1-2. – С. 71-81.

60. Миттова, И. Я. Наноматериалы : синтез нанокристаллических порошков и получение компактных нанокристаллических материалов : Учеб. пособие / И. Я. Миттова, Е. В. Томина, С. С. Лаврушина – Учеб. пособие. – Воронеж : ИПЦ ВГУ, 2007. – 35 с.
61. Остроушко, А. А. Методы получения порошков сложных оксидов с использованием в качестве исходных реагентов солевых форм [Электронный ресурс] / А. А. Остроушко, Ю. В. Могильников // Физико-химические основы получения твердофазных материалов электронной техники. – Екатеринбург, 1999. – Режим доступа : <http://www.eunnet.net/metod_materials/wm7/pol_salt.htm#_Toc422560980>. – Загол. з екрану.
62. Kear, B. H. On the Processing of Nanocrystalline and Nanocomposite Ceramics / B. H. Kear, J. Colaizzi, W. E. Mayo, S.-C. Liao // Scripta Materialia. – 2001. – V. 44, No. 8/9. – PP. 2065-2068.
63. Алымов, М. И. Электроно-микроскопическое исследование структуры компакта, экструдированного из нанопорошка никеля / М. И. Алымов, А. И. Епишин, Г. Нольце и др. // Российские нанотехнологии. – 2007. – № 3-4. – С. 124-129.
64. Бербенцев, В. Д. Консолидация нанопорошков методом газовой экструзии / В. Д. Бербенцев, М. И. Алымов, С. С. Бедов // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2, № 7-8. – С. 116-120.
65. Хасанов, О. Л. Методы компактирования и консолидации наноструктурных материалов и изделий / О. Л. Хасанов, Э. С. Двилис, З. Г. Бикбаева. – Томск : Изд-во Томского политехн. ун-та, 2008. – 212 с.
66. Мармер, Э. Н. Вакуумное спекание керамики их порошков диоксида циркония / Э. Н. Мармер, Ю. М. Балаклиенко, С. А. Новожилов и др. // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». – 2007. – № 6(50). – С. 41-43.
67. Анненков, Ю. М. Физическая модель спекания и модифицирования керамики в высокочастотных и сверхвысокочастотных полях / Ю. М. Анненков, А. С. Ивашутенко // Изв. Томск. политехн. ун-та. – 2005. – Т. 308, № 7. – С. 30-35.
68. Анненков, Ю. М. Эффективность методов прессования корундо-циркониевых порошков различной дисперсности / Ю. М. Анненков, В. В. Иванов, А. С. Ивашутенко, А. А. Кондратюк // Изв. Томск. политехн. ун-та. – 2005. – Т. 308, № 7. – С. 39-42.
69. Котов, Ю. А. Порошковые нанотехнологии для создания функциональных материалов и устройств электрохимической энергетики / Ю. А. Котов, В. В. Иванов // Вестник Российской академии наук. – 2008. – Т. 78, № 9. – С. 777-791.
70. Коноваленко, А. Д. Новые направления развития СВС-технологий / А. Д. Коноваленко, В. В. Драгобецкий // Системні технології. – 2003. – № 6. – С. 68-73.
71. Боровинских, И. П. СВС-керамика: синтез, применение, технология / И. П. Боровинских // Инженер, технолог, рабочий. – 2002. – № 6(18). – С. 28-35.
72. Андриевский, Р. А. Порошковое материаловедение / Р. А. Андриевский. – М. : Металлургия, 1991. – 205 с.
73. Habra, N. E. Stabilized Zirconia-Based Materials for Solid Oxide Fuel Cells (SOFC) obtained by MOCVD and Aerosol-CVDECS / N. E. Habra, M. Bolzan, C. Zorzi, et al. // ECTS Transactions. – 2009. – V. 25, No. 8. – PP. 805-812.
74. Oh, E. Thin film yttria-stabilized zirconia electrolyte for intermediate-temperature solid oxide fuel cells (IT-SOFCs) by chemical solution deposition / E. Oh, C. Whang, Y. Lee, et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2012. – V. 32, No. 8. – PP. 1733-1741.
75. Suresh, A. Crystallite and Grain-Size-Dependent Phase Transformations in Yttria-Dopped Zirconia / A. Suresh, M. J. Mayo // Journal of the American Ceramic Society. – 2003. – V. 86, No. 2. – PP. 360-362.
76. Лукин, Е. С. Современная оксидная керамика и области ее применения / Е. С. Лукин,

- Н. А. Макаров, А. И. Козлов и др. // Конструкции из композиционных материалов. – 2007. – № 1. – С. 3-13.
77. Акимов, Г. Я. О структурных особенностях, формирующих механические свойства керамики из частично стабилизированного ионами Y и Mg диоксида циркония / Г. Я. Акимов // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – № 12. – С. 15-17.
78. Шевченко, А. В. Высокотехнологичная керамика на основе диоксида циркония / А. В. Шевченко, А. К. Рубан, Е. В. Дудник // Огнеупоры и техническая керамика. – 2000. – № 9. – С. 2-8.
79. Промахов, В. В. Кинетика структурно-фазовых изменений при циклическом спекании порошковой системы $ZrO_2 - MgO$ / В. В. Промахов, С. П. Буякова, Т. С. Семейцева и др. // Обработка металлов. – 2011. – Т. 52, № 3. – С. 65-68.
80. Панова, Т. И. Синтез и исследование нанокристаллической керамики в системе $ZrO - CeO_2 - Al_2O_3$ / Т. И. Панова, М. Ю. Арсентьев, Л. В. Морозова, И. А. Дроздова // Физика и химия стекла. – 2010. – Т. 36, № 4. – С. 585-595.
81. Подзорова, Л. И. Влияние последовательности осаждения компонентов на фазообразование в системе $ZrO_2 - CeO_2 - Al_2O_3$ / Л. И. Подзорова, А. А. Ильичева, Л. И. Шворнева // Неорганические материалы. – 2007. – Т. 43, № 9. – С. 1086-1089.
82. Гаршин, А. П. Керамика для машиностроения / А. П. Гаршин, В. М. Гропянов, Г. П. Зайцев, С. С. Семенов. – М.: Научтехлитиздат, 2003. – 384 с.
83. Sakka, Y. Colloidal processing and superplastic properties of zirconia and alumina-based nanocomposites / Y. Sakka, T. Suzuki, K. Morita, et al. // Scripta Materials. – 2001. – V. 44. – PP. 2075-2078.
84. Grabis, J. Preparation and characterization of $ZrO_2-Al_2O_3$ particulate nanocomposites produced by plasma technique / J. Grabis, I. Steins, D. Rasmane, et al. // Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Engineering. – 2006. – V. 12, № 4. – PP. 349-357.
85. Sarkar, D. Preparation and characterization of an $Al_2O_3-ZrO_2$ nanocomposite. Part I: Powder synthesis and transformation behavior during fracture / D. Sarkar, S. Adak, N. K. Mitra // Composites, Part A. – 2007. – V. 38, No. 1. – PP. 124-131.
86. Kerwijk-Mulder, E. Zirconia-alumina ceramic composites with extremely high wear resistance / E. Kerwijk-Mulder, H. Verweij // Advanced Ceramic Materials. – 1999. – V. 1. – PP. 69-71.
87. Jayaseelan, D. D. Pulse electric current sintering of $Al_2O_3/3$ vol.% ZrO_2 with constrained grains and high strength / D. D. Jayaseelan, N. Kondo, D. A. Rani, et al. // Journal of the American Ceramic Society. – 2002. – V. 85. – PP. 2870-2872.
88. Vasilkiv, O. Low-Temperature Processing and Mechanical Properties of Zirconia and Zirconia-Alumina Nanoceramics / O. Vasilkiv, Y. Sakka, V. Skorokhod // Journal of the American Ceramic Society. – 2003. – V. 86, No. 2. – PP. 299-304.
89. Ильичева, А. А. Морфологические особенности нанопорошков системы $ZrO_2 - Al_2O_3 - CeO_2$ в зависимости от условий получения прекурсоров / А. А. Ильичева, С. В. Куцев, Л. И. Подзорова и др. // Стекло и керамика. – 2009. – Т. 10. – С. 26-29.
90. Pinggen, R. P. Effect of Al_2O_3 addition on ZrO_2 phase composition in the $Al_2O_3 - ZrO_2$ system / R. P. Pinggen, M. Iwasa, J. Wu, et al. // Ceramics International. – 2004. – V. 30. – PP. 923-926.
91. Альмяшева, О. В. Образование наночастиц и аморфного оксида алюминия в системе $ZrO_2-Al_2O_3-H_2O$ в гидротермальных условиях / О. В. Альмяшева, В. В. Гусаров // Журнал неорганической химии. – 2007. – Т. 52, № 8. – С. 1194-1196.
92. Кучук, И. С. Структурные превращения в нанокompозите $ZrO_2 - Al_2O_3$ в процессе термической обработки / И. С. Кучук, О. В. Альмяшева // Наносистемы: физика, химия, математика. – 2012. – Т. 3, № 3. – С. 123-129.

93. Савицкий, Б. М. Монокристаллы тугоплавких и редких металлов и сплавов / Б. М. Савицкий, Г. С. Бурханов. – М. : Наука, 1972. – 259 с.
94. Медведев, С. А. Введение в технологию полупроводниковых материалов / С. А. Медведев. – М. : Высшая школа, 1970. – 504 с.
95. Григорьев, О. Н. Свойства высокодисперсных порошков карбида вольфрама, полученных методом высокотемпературного электрохимического синтеза / О. Н. Григорьев, Х. Б. Кушхов // Порошковая металлургия. – 1991. – № 8. – С. 1-4.
96. Попов, В. П. Структура и свойства карбида вольфрама, полученного электроразрядным спеканием дисперсного порошка / В.П.Попов, А.М.Шатохина // Порошковая металлургия. – 1995. – № 9-10. – С.17-20.
97. Кислый, П. С. Керметы / П. С. Кислый. – К. : Наукова думка, 1975. – 350 с.
98. Пантелеев, И. Б. Твердые сплавы WC-Zr_{1-x}W_xC_{1-y}N_y-Co / И. Б. Пантелеев, С. Н. Перевислов, С. С. Орданьян // Вопросы материаловедения. – 2009. – № 4(60). – С. 36-41.
99. Sarbu, C. Phase instability in ZrO₂-TiB₂ composites / C. Sarbu, J. Vleugels, O. Van der Biest // Journal of the European ceramic society. – 2007. – V. 27, No. 5. – PP. 2203-2208.
100. Геворкян, Э. С. Твердые сплавы, алюминиево- и цирконевооксидные композиты на бимодальной вольфрамокарбидной основе / Э. С. Геворкян, Ю. Г. Гуцаленко, О. М. Мельник // Современные инновации в науке и технике : II Междунар. науч.-практ. конф., 18 апр. 2012 г. : текст докл. – Курск, 2012. – С. 9-12.
101. Геворкян, Э. С. nWC-дополненные WC – Co твердые сплавы и Al – Zr – оксидные композиты / Э. С. Геворкян, Ю. Г. Гуцаленко, О. М. Мельник // Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте : 12-й Междунар. науч.-техн. семинар, 20-24 фев. 2012 г. : текст докл. – Свалява, 2012 – Киев : АТМ Украины, 2012. – С. 58-60.
102. Геворкян, Е. С. Практика включеного використання нанопорошків карбиду вольфраму у композиціях для пресованого електроспінання керметів / Е. С. Геворкян, Ю. Г. Гуцаленко, О. М. Мельник // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : XX міжнар. наук.-практ. конф., 15-17 трав. 2012 р. : тези доп. – Х. : НТУ «ХП», 2012. – Ч. I. – 2012. – С. 97.
103. Sun, J. Mechanical properties and microstructure of ZrO₂-TiN-Al₂O₃ composite ceramics / J. Sun, C. Huang, J. Wang, H. Liu // Materials Science And Engineering: A. – 2006. – V. 416, No. 1-2. – PP. 104-108.
104. Basu, B. Development of WC-ZrO₂ nanocomposites by spark plasma sintering / B. Basu, J. H. Lee, D. Y. Kim // Journal of the American Ceramic Society. – 2004. – V. 87, No. 2. – PP. 317-319.
105. Pedzich, Z. Zirconia matrix-tungsten carbide particulate composites manufactured by hot-pressing technique / Z. Pedzich, K. Haberk, J. Piekarczyk, et al. // Materials Letters. – 1998. – V. 36, No. 1-4. – PP.70-75.
106. Чуви́льдеев, В. Н. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения / В. Н. Чуви́льдеев. – М. : Физматлит, 2004. – 304 с.
107. Shen, Z. Spark plasma sintering of alumina / Z. Shen, M. Johnsson, Z. Zhao, M. Nygren // Journal of the American Ceramic Society. – 2002. – V. 85, No. 8. – PP. 1921-1927.
108. Munir, Z. A. Electric current activation of sintering : a review of the pulsed electric current sintering process / Z. A. Munir, D. V. Quach // Journal of the American Ceramic Society. – 2011. – V. 94, No. 1. – PP. 1-19.
109. Райченко, А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / Райченко А. И. – М. : Металлургия, 1987. – 128 с.
110. Tokita, M. Mechanism of Spark Plasma Sintering / M. Tokita. // Journal of Materials Science. – 2004. – V. 5, No. 45. – PP. 78-82.

111. Anselmi-Tamburini, U. Fast low-temperature consolidation of nanometric ceramic materials / U. Anselmi-Tamburini, J. E. Garay, Z. A. Munir // Scripta Materialia. – 2006. – V. 54. – PP. 823-828.
112. Chen, W. Fundamental investigations on the spark plasma sintering synthesis process. I. Effect of DC pulsing on reactivity / W. Chen, U. Anselmi-Tamburini, J. E. Garay, et al. // Materials Science and Engineering : A. – 2005. – V. 394, No. 139-148.
113. Геворкян, Э. С. Особенности и место электроконсолидации прямым действием переменного тока в системе методов субмикро- и нанопорошкового спекания под давлением / Э. С. Геворкян, Ю. Г. Гуцаленко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». – 2010. – № 49. – С. 144-161.
114. Геворкян, Э. С. Оптимизация режимов горячего прессования нанопорошковых смесей Al_2O_3 -WC при воздействии электрического тока / Э. С. Геворкян, О. М. Мельник // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». – 2010. – № 66. – С. 24-32.
115. Геворкян, Э. С. Горячее прессование нанопорошков состава ZrO_2 -5 % Y_2O_3 / Э. С. Геворкян, В. П. Нерубацкий, О. М. Мельник // Зб. наук. пр. Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Х. : УкрДАЗТ. – 2010. – № 119. – С.106-110.
116. Геворкян, Э. С. Некоторые особенности структурообразования материалов на основе нанопорошков частично стабилизированного диоксида циркония горячим прессованием с прямым пропусканием тока / Э. С. Геворкян, О. М. Мельник, В. А. Чишкала // Вісн. Нац. техн. ун-ту «Харк. політехн. ін-т». – 2011. – № 50. – С. 50-54.
117. Геворкян, Э. С. Исследование закономерностей спекания изделий из нанопорошков Al_2O_3 , ZrO_2 / Э. С. Геворкян, О. М. Мельник // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: 10-й Юбилейная Междунар. науч.-практ. конф., 27 сент. – 1 окт. 2010 г. : текст докл. – Ялта, 2010. – Киев : АТМ Украины, 2010. – С. 32-33.
118. Геворкян, Э. С. Структура и свойства нанопористой керамики Al_2O_3 / Э. С. Геворкян, В. В. Сирота, О. М. Мельник, В. В. Иванисенко // Розвиток наук. та інновац. діяльності на транспорті : 75-та Міжнар. наук.-техн. конф., 24-25 квіт. 2013 р. : тези доп. – Х., 2013. – С. 347-348.

У повному обсязі матеріали рукописи в комп'ютерній верстці в складі депонованого звіту про НДР надаються за договором з організацією державної реєстрації та обліку НДДКР: Український інститут науково-технічної експертизи та інформації (УкрІНТЕІ) [сайт: <<http://www.uinte.kiev.ua>>, адреса: 03171, м. Київ-171, вул. Антоновича, 180].